



Experimentální Analýza Napětí 2001

Experimental Stress Analysis 2001

39th International Conference

June 4 - 6 , 2001 Tábor, Czech Republic

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELASTIC PARAMETERS OF RUBBERS AT VARIOUS TEMPERATURES

EXPERIMENTÁLNÍ URČOVÁNÍ ELASTICKÝCH PARAMETRŮ PRYŽÍ PŘI RŮZNÝCH TEPLOTÁCH

Jiří BURŠA¹, Přemysl JANÍČEK¹, Františka PEŠLOVÁ²

***Abstract:** The paper deals with measuring of stress-strain curves of rubbers. As the computational modelling of stress-strain states in these materials was not realizable till the last decade because of their large distortions, many producers and users do not know their material properties in a sufficient range. Because of their non-linear behaviour it is not sufficient to evaluate the usual elastic constants but the stress-strain curves have to be measured for the whole range of strains expected in computational modelling. It is necessary to measure these curves in tension, compression and torsion to achieve credible results of computational modelling. Various definitions of stress and strain tensors in the case of large strains have to be distinguished when describing and using these curves. The results of these tests realized at various temperatures are presented and analysed in the paper, namely for several types of rubbers used in production of tyres. Torsional hysteresis curves of rubber are presented as well being able to compare various types of rubbers from the point of view of energy dissipation under cyclic loading.*

Keywords: Hyperelastic materials, large strain, material tests in tension, compression and torsion, hysteresis curves.

1. Úvod

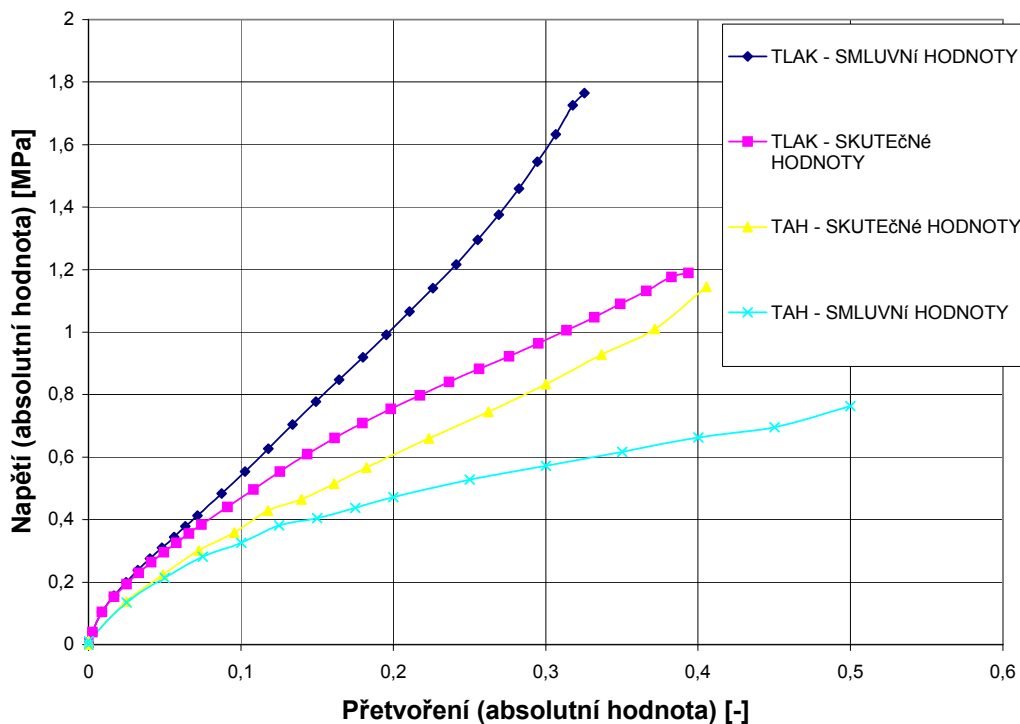
Úroveň výpočtů v oblasti mechaniky prodělala v posledních desetiletích dvě zásadní kvalitativní změny. První všeobecně známou, bylo rozšíření numerických metod, v oblasti napět'ově-deformační analýzy především metody konečných prvků. Druhý skok srovnatelného významu však proběhl v posledním desetiletí právě uplynulého století a není dosud ukončen. Jedná se o rozšíření aplikací metody konečných prvků do mnoha oblastí nelineární mechaniky, které bylo umožněno enormním nárůstem kapacitních možností a rychlosti počítačů. Na něj reagovali výrobci softwaru a nabídli výpočtářům dosud netušené možnosti výpočtového modelování. Ti však najednou potřebují nesrovnatelně větší množství vstupních údajů. Zatímco předcházející generace vystačily při napět'ově-deformační analýze se dvěma elastickými konstantami, modulem pružnosti v tahu a součinitelem příčné kontrakce, dnes lze výpočtově modelovat stále komplikovanější typy materiálů a tím usnadňovat jejich praktické uplatnění. I u takových tradičních materiálů, jako je pryž,

¹ Ing. Jiří Burša, PhD., tel.:+420.5.41142868, E-Mail: bursa@umtn.fme.vutbr.cz.

Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc., tel.:+420.5.41142807, E-Mail: Janicek@umtn.fme.vutbr.cz.
VUT FSI Brno, Ústav mechaniky těles, Technická 2, 61669 Brno; fax: +420.5.41142876

² Prof. Ing. Františka Pešlová, CS., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta J. Pernera, Slovanská 452, 56002 Česká Třebová; tel.: +420.465.533006, E-Mail: frantiskap@hotmail.com.

donedávna nebylo prakticky možné provádět napjatostně-deformační analýzu v důsledku jejich velkých deformací dosahujících desítek i stovek procent. Nové možnosti lze však plně využívat jedině tam, kde stejný kvalitativní skok proběhl i ve zkušebnictví, aby úroveň vstupních údajů odpovídala úrovni výpočtového modelu. Výpočtáři se totiž často dostávají do situace, že své dokonalé a drahé výpočtové modely nemají čím „nakrmit“. Všeobecná technická veřejnost ještě plně neakceptovala fakt, že dokonalejší výpočtové modely např. nelineárně elastického, viskoelastického nebo neizotropního chování materiálů vyžadují podstatně větší rozsah vstupních údajů a tím i prováděných materiálových zkoušek. Proto se náš příspěvek zabývá experimentálním získáváním podkladů pro výpočtové modelování napjatosti a deformace u pryží, které jsou nejčastějším příkladem technického hyperelastického materiálu.



Obr.1: Porovnání tahových a tlakových křivek pryže vyjádřených v různých tenzorech napětí a přetvoření

2. Rozsah potřebných materiálových zkoušek a jejich vyhodnocování

Připomeňme nejdříve základní odlišnosti od lineární teorie pružnosti, která počítá s malými přetvořeními, a to pro jednoduchost pouze na příkladu tahové zkoušky, při níž je v měřené části vzorku homogenní jednoosá napjatost. Obvyklý způsob určování přetvoření podle vztahu $\varepsilon = \Delta l/l_0$ (inženýrské nebo také smluvní hodnoty), vyjadřovaný často v procentech původní délky l_0 a v teorii pružnosti označovaný nejčastěji jako Greenův tenzor malých přetvoření, již při hodnotách řádu desítek procent vede k výraznému rozporu s realitou, protože skutečná délka vzorku se od původní značně liší. Programy MKP však řeší nelineární úlohy rozdělením zatížení na řadu malých zátěžných kroků, po každém z nich je geometrie modelu modifikována a přetvoření i napětí se počítají vzhledem k této skutečné geometrii. U tenzoru přetvoření vede tento postup na tzv. Cauchyho neboli logaritmický tenzor přetvoření, definovaný vztahem $\varepsilon_c = \ln \lambda$, kde poměrné protažení $\lambda=l/l_0$ je poměr konečné a původní délky. Podobně u tenzoru napětí jsou běžná inženýrská neboli smluvní

napětí (označovaná v teorii pružnosti nejčastěji jako Lagrangeův tenzor napětí a definovaná jako poměr působící síly k výchozímu příčnému průřezu vzorku) značně odlišná od napětí skutečných (Cauchyho tenzor napětí), která pro výpočet používají skutečný, deformovaný průřez vzorku. Jaké mohou být rozdíly mezi křivkami napětí - přetvoření pro různé definice těchto tenzorů, ukazuje obr. 1. Z něj je také zřejmé, že v oblasti velkých deformací prakticky nelze předpokládat lineární chování materiálu. I kdyby křivka síla - prodloužení a tím i křivka napětí - přetvoření ve smluvních hodnotách byly přibližně lineární, závislost skutečných napětí na logaritmických přetvořeních je i pak výrazně nelineární. Je tedy pochopitelné, že pro popis chování takového materiálu nemůže být dostačující charakteristikou modul pružnosti, příp. Poissonova konstanta. Tuto samozřejmost připomínáme proto, že v praxi obvykle od výrobců nebo uživatelů materiálů dostaneme jako podklady pro výpočet pouze tyto zcela nedostačující hodnoty.

Pro modelování materiálových vlastností pryží, které jsou s výjimkou pryží pěnových téměř nestlačitelné, se používá v programech MKP nejčastěji model Mooney-Rivlinův, použitelný pro velikosti přetvoření až stovek procent. Pro výpočet konstant tohoto modelu je zapotřebí znát křivku napětí-přetvoření minimálně v takovém rozsahu přetvoření, v jakém se budou pohybovat hodnoty u řešeného modelu. Protože v praxi se téměř v každé součásti vyskytují i přetvoření záporná, znamená to, že musíme měřit i při namáhání tlakem. Rovněž určení smykových složek napětí a přetvoření, který se v oblasti malých deformací řeší výpočtem modulu pružnosti ve smyku podle známého vztahu $G = E/(2+2\mu)$, zde vyžaduje zvláštní zkoušku. Protože prostý smyk nelze realizovat, používá se zkouška krutem. Pro určení konstant Mooney-Rivlinova modelu je proto nutné znát průběhy křivek napětí - přetvoření pro tři typy zkoušek, jimiž jsou nejčastěji zkoušky tahem, tlakem a krutem. Tyto tři typy zkoušek byly předmětem našich experimentů, prováděných na několika typech pryže používaných pro výrobu pneumatik.

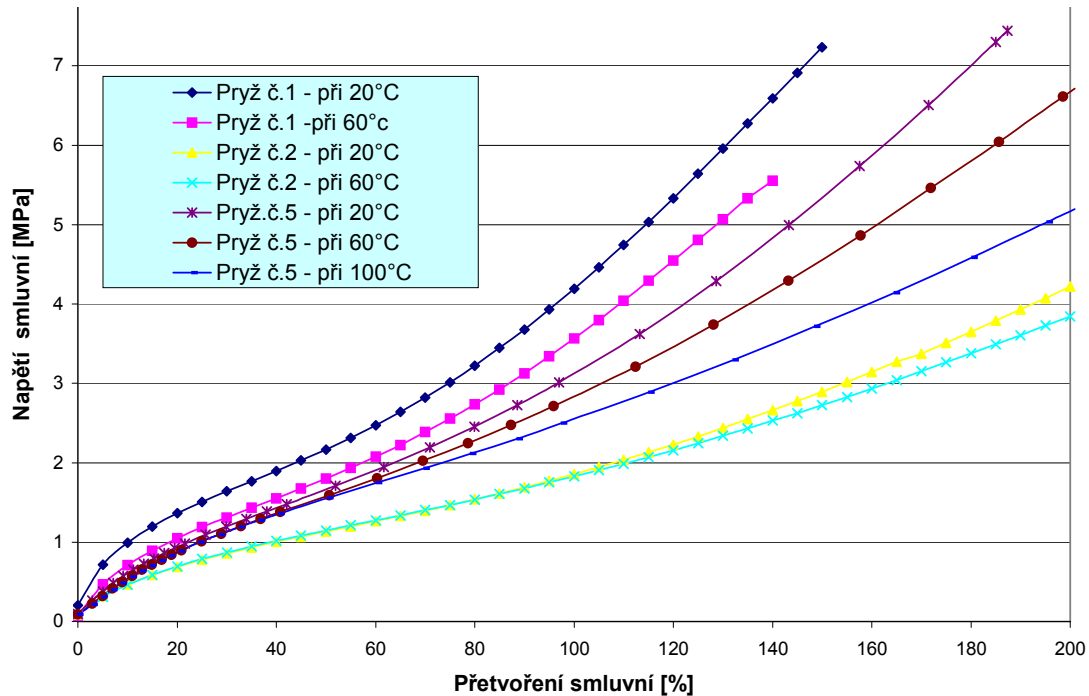
3. Výsledky a vyhodnocení

a) Zkoušky tahem

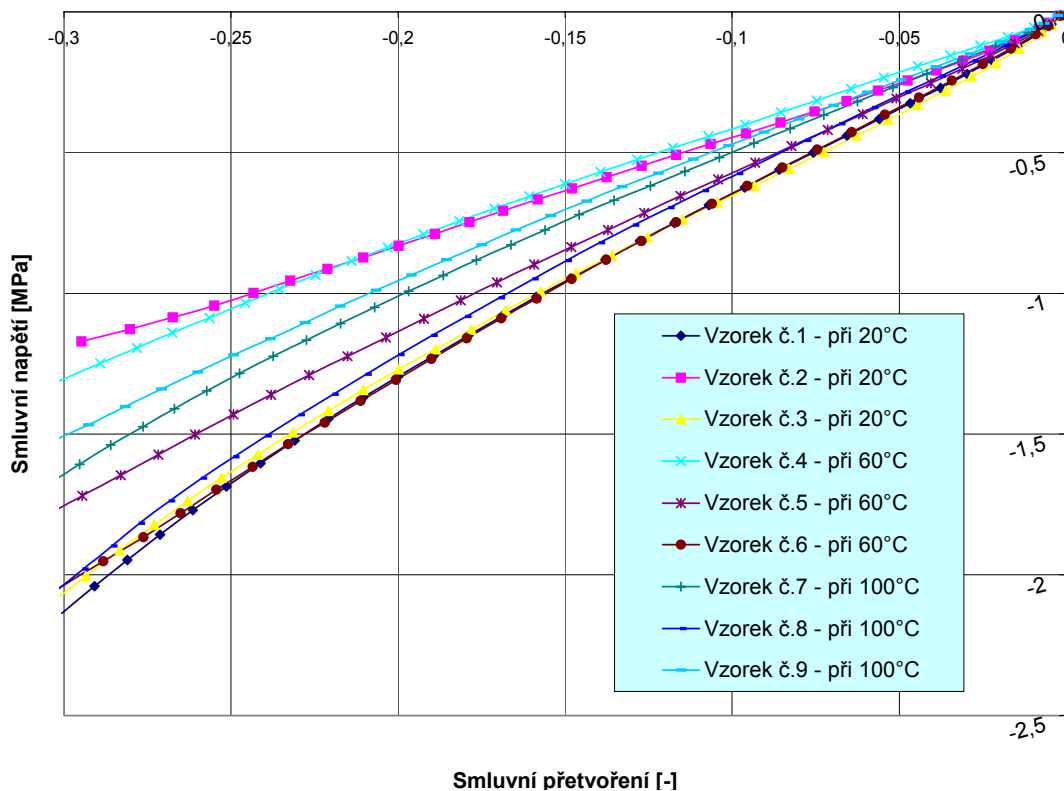
Pro zkoušky tahem byly používány standardizované ploché vzorky o tloušťce 2,25 mm. Byly zatěžovány do poměrného protažení asi 150, příp. 200 %, protože větší deformace jsou omezeny rozměry teplotní komory. Tento rozsah však pro výpočtové modelování naprosto dostačuje, i když deformace při porušení jsou ještě několikanásobně vyšší (okolo 600%). Při teplotě 20°C byly měřeny a statisticky vyhodnoceny pro každý typ pryže 4 vzorky, orientačně pak byl jeden vzorek vyhodnocen při teplotě 60°C. Příklady naměřených závislostí napětí - přetvoření ukazují pro některé vyšetřované typy pryží grafy na obr.2. Lze z nich učinit následující závěry:

- Vlastnosti tří zkoumaných typů pryže se liší poměrně málo, rozdíly mezi nimi jsou pod 10%. Liší se pryž č.5 a výrazně pryž č.2, která je téměř třikrát poddajnější.
- Chování všech typů pryže je v měřeném rozsahu výrazně nelineární s inflexním bodem na křivce napětí - přetvoření. Tento bod leží v oblasti přetvoření kolem 30%, pouze u pryže č. 2 je inflexní bod až v oblasti kolem 50% přetvoření.
- Zkoušky při teplotě 20°C vykazují malý rozptyl. Střední chyba hodnot napětí při daném přetvoření je většinou pod 2%, s výjimkou pryže č.4, kde odchylka dosahuje 4%. Pouze při malých hodnotách přetvoření jsou procentuální odchylky samozřejmě vyšší.
- Při teplotě 60°C dochází většinou k poklesu hodnot napětí o 10-20%. Přesto však lze vysledovat jisté rozdílnosti. Zatímco u pryží č.3 a 4 se pokles tuhosti s teplotou zvyšuje s rostoucí deformací, pryž č.1 se chová jinak. Její křivky při obou teplotách se jeví v poměrně širokém rozsahu deformací jako téměř ekvidistantní, takže s rostoucí

deformaci procentuální rozdíl mezi nimi naopak klesá. Výjimku tvoří opět měkčí pryž č.2, která až do přetvoření cca 100% nevykazuje změnu vlastností s teplotou a pokles nepřesahuje 7% ani pro vyšší zatížení. Výraznější pokles napětí (o 30-40%) nastává při teplotě 100°C, která však byla dosud realizována jen pro pryž č.5. Pro věrohodnost těchto závěrů však je nutné provést větší počet zkoušek.



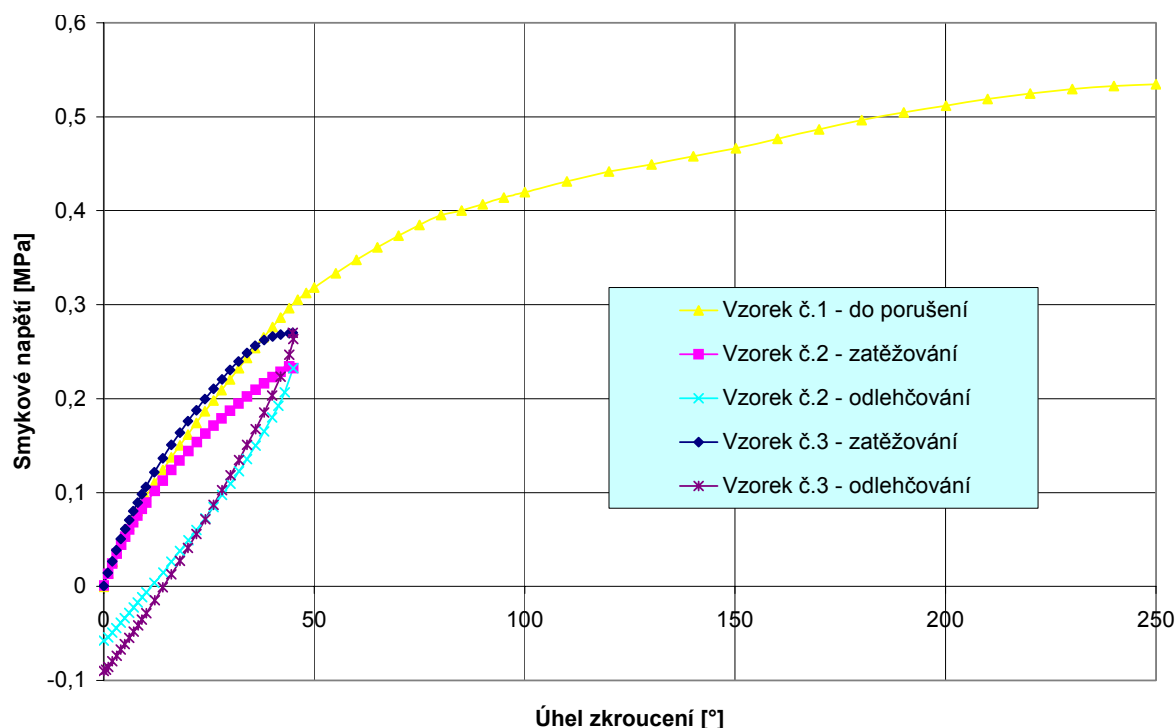
Obr. 2: Příklady tahových křivek pryží při různých teplotách



Obr.3: Tlakové křivky při různých teplotách

b) Zkoušky tlakem

Pro zkoušky tlakem byly k dispozici pouze vzorky jednoho druhu pryže. Šlo zatím především o určení vhodného tvaru vzorku, výrobu a testování upínacích přípravků. Pro dosažení co nejlepší přesnosti výsledků je totiž třeba najít kompromisní délku vzorku. Při malé délce vzorku je větší vliv uchycení vzorku, takže v důsledku tření vzniká v oblasti uchycení víceosá napjatost, zvyšující chybu měření. Naopak u příliš dlouhých vzorků může dojít ke ztrátě tvarové stability. Proto byly válcové vzorky upnuty do speciálních upínacích přípravků, které při průměru vzorku cca 40 mm umožnily jeho funkční délku až 100 mm bez ztráty tvarové stability. Naměřené křivky jsou na obr. 3. Na první pohled je viditelný jejich veliký rozptyl, který překrývá i teplotní závislost. Jeho vysvětlením může být jediné značná nehomogenita materiálu vzorků, řádově vyšší než u maloobjemových vzorků pro zkoušky tahem. Vzorky byly proto zaslány k rozboru a posouzení nehomogenity na Trenčianskou univerzitu, Fakultu priemyselných technológií v Púchove, Katedru fyzikálneho inžinierstva materiálov, která má úzkou spolupráci s výrobcem pneumatik Matador Púchov. Zkoušky nemá smysl dále analyzovat a mohou sloužit spíše pro výrobce k posouzení technologie výroby. Je zřejmé, že při takovém rozptylu vlastností základního materiálu nelze zajistit vlastnosti konečného výrobku v požadovaných úzkých tolerancích. Nelze ovšem s jistotou říci, zda výrobě zkušebních vzorků byla věnována stejná péče, jaká je obvyklá v sériové výrobě.



Obr. 4: Průběhy zkoušek krutem u pryže

c) Zkoušky krutem

Zkoušky krutem byly zatím provedeny rovněž jen v omezeném rozsahu, protože nová torzní hlava byla uváděna do provozu až v průběhu letošního roku. Výsledky pro tři vzorky ze stejného druhu pryže ukazuje graf na obr.4. Opět je vidět velký rozptyl hodnot jednotlivých křivek, dosahující $\pm 13\%$. Jedná se o vzorky ze stejné série jako pro zkoušky tlakem, takže opět lze očekávat výraznou nehomogenitu materiálu. Při zkouškách krutem byl zaznamenáván

i průběh odlehčování, který vykazuje výraznou hysterezi. Ta je pro pryž na výrobu pneumatik zcela jistě významným parametrem a nelze ji vyhodnotit při zkouškách tahem na normalizovaných vzorcích. Přitom porovnání různých druhů pryží z hlediska dissipace energie při zátěžných cyklech je podstatně jednodušší a efektivnější, než např. měření tepla vznikajícího při deformaci, které se snaží měřit někteří výrobci pneumatik. Navíc naše výsledky výpočtového modelování chování kompozitů pryž – ocel, publikované např. v [1] a [2] ukazují, že právě smyková složka deformace a napjatosti je u těchto materiálů velmi významná. Je možné proto tvrdit, že při využití všech potenciálních možností může být zkouška krutem schopna poskytnout velmi důležité informace pro výrobce i zpracovatele pryží.

4. Závěr

K věrohodnému a tím i efektivnímu výpočtovému modelování napjatosti a deformace hyperelastických materiálů (pryže) je třeba zajistit velké množství vstupních materiálových údajů. Bez nich jsou investice do kvalitního softwaru i nejvýkonnějšího hardwaru pro výpočtové modelování naprosto znehodnoceny. Autoři prezentují možnosti zkušebního stroje Zwick, vybaveného torzní hlavou a teplotní komorou. Ten je schopen změřit veškeré materiálové údaje, potřebné pro výpočtové modelování napjatosti a deformace materiálů vykazujících velké deformace, tzn. křivky napětí – přetvoření pro zatížení tahem, tlakem i krutem, včetně jejich teplotních závislostí. Kromě toho umožňuje rovněž vyhodnocování hysterezních křivek, což není možné hodnotit na běžných normalizovaných vzorcích pro zkoušku tahem. Protože plocha hysterezní smyčky je mírou energie dissipované během zátěžného cyklu, jsou tyto zkoušky vhodné pro jednoduché porovnávání jednotlivých typů pryží z hlediska vlivu na jízdní odpory, jako jeden z nejdůležitějších parametrů pneumatik, ovlivňující přímo spotřebu pohonných hmot.

5. Literatura

1. Burša J., Pešlová F., Janíček P.: *Evaluation of fatigue tests of fiber composites undergoing large deformations*. Sborník mezinárodní konference Inženýrská mechanika 2000, květen 2000, Svratka, Vol. IV, pp.75-80. ISBN 80-86246-07-8
2. Burša J., Janíček P., Pešlová F.: *Experimental – computational analysis of adhesion and fracture in a composite “rubber – steel wire rope”*. Sborník mezinárodní konference Inženýrská mechanika 2001, květen 2001, Svratka (v tisku).
3. Burša J., Pešlová F., Letko I., Janíček P.: *Comprehensive approach to computational modelling of properties and behaviour of tyres*. In: Proceedings of the 5th Polish-Slovak Conference on COMPUTER SIMULATION IN MACHINE DESIGN. Wierzba, Poland, September 2000, pp. 27-32. ISBN 83-912190-3-8.

Práce byla provedena v rámci Výzkumného záměru MŠMT č. MSM:262100001.